Вестник Донского государственного технического университета. 2019. Т. 19, № 4. С. 310–316. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006
Vestnik of Don State Technical University. 2019. Vol. 19, no. 4, pp. 310–316. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE

УДК 678.549 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-4-310-316

Влияние волнового эффекта на предел прочности волокна при испытаниях композитного материала на растяжение*

И. Р. Антибас[1], Амер Карнуб[2], А. Г. Дьяченко[3]**
[1,3]Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация
[2]ETH Zurich, Цюрих, Швейцария

Influence of wave effect on fiber stress limit under tensile tests of composite material ***

I. R. Antypas[1], Amer Karnoub[2], A.G. Dyachenko[3]**
[1,3]Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
[2]ETH Zurich, Zurich, Switzerland

Введение. Реакция композиционных материалов на воздействие определённого рода нагрузок трудно прогнозируема, поэтому исследованиям в этой области не уделялось должного внимания. Целью настоящей работы было изучение влияния волнового эффекта на предел прочности при растяжении полимерных композитов волокнистой структуры.
Материалы и методы. В испытаниях использовались образцы многослойных материалов различной толщины с непрерывными, длинными и короткими волокнами, образующими ткань, а также слоистую структуру. Число слоев соответствует сопротивляемости приложенным нагрузкам. Применялись волокна стекла, углерода, кевлара или их комбинации. В качестве связующих использовали изотропные материалы: эпоксид, полиэфир и виниловый эфир.
Результаты исследования: Получены результаты испытания на растяжение гомогенных образцов и образцов волокнистой структуры. При этом варьировались значения угла наклона волокон. Установлена стабильность результатов испытания путем их взаимного сравнения. Получена зависимость максимальных напряжений при растяжении σ_{max}, МПа, (на вертикальной оси) от угла наклона волокна θ_{max}. Эти напряжения для материала с безволновыми волокнами составили 250 МПа. Рассчитаны нормальные и касательные напряжения, действующие перпендикулярно волокнам, а также напряжения слоистого материала при сдвиге. В результате анализа зависимостей для характерных напряжений при растяжении и исследования рефракции в сечении разрушения образцов установлено, что причиной разрушения является напряжение сдвига τ_{xy}. С помощью уравнения, которое позволяет компенсировать угол наклона $\theta = 45°$, было определено, что значение напряжения сдвига полиэстера $\tau_{xy} = 35$ МПа. Это и есть напряжение, которое впоследствии явилось причиной разрушения образцов.
Обсуждение и заключения: Напряжения при растяжении

Introduction. The response of composite materials to the impact of a certain kind of load is difficult to predict, therefore, research in this area has often been neglected. The work objective was to study the influence of the wave effect on the tensile strength of polymer composites of a fibrous structure.
Materials and Methods. In the tests, samples of multilayer materials of various thicknesses with continuous, long and short fibers that form a fabric, as well as a layered structure, were used. The number of layers corresponds to the resistance to the applied loads. Fibers of glass, carbon, kevlar, or their combinations were used. Isotropic materials – epoxide, polyester and vinyl ether – were used as binders.
Research Results. The tensile test results of homogeneous samples and samples of fibrous structure are obtained. In this case, the values of fiber angle varied. The stability of their intercomparison test results is established. The dependence of the maximum tensile stresses σ_{max}, MPa, (on the vertical axis) on the fiber angle θ_{max} is obtained. These stresses for a fibreless material amounted to 250 MPa. Normal and tangential stresses acting perpendicular to the fibers, as well as shear stresses of the layered material, are calculated. As follows from the analysis of the dependences for the significant tensile stresses and from the study on refraction in the section of the sample damage, it was established that the shear stress τ_{xy} was the cause of the fracture. Using an equation providing the compensation for the angle of inclination θ = 45, it was determined that the shear stress of the polyester is τ_{xy} = 35 MPa. This was the stress that caused subsequently the destruction of the samples.
Discussion and Conclusions. The tensile stresses of the com-

* Работа выполнено в рамках инициативной НИР.
** E-mail: imad.antypas@mail.ru, amerkarnoub@gmail.com, alexey-a2@mail.ru
*** The research is done within the frame of the independent R&D.

композитного материала уменьшаются с увеличением угла наклона волокон в определенных зонах. Разрушение всех образцов волокна наступало тогда, когда величина напряжения сдвига достигала значения, примерно равного величине напряжения сдвига, при котором происходило разрушение образцов, изготовленных только из связующего материала. При разрыве образца форма разрушения имела вид, аналогичный разрушению при сдвиге, причём в момент разрушения объект, имеющий прямоугольную форму, деформируясь под углом, принимал форму параллелограмма.

posite material decrease with increasing the fiber angle in certain areas. The destruction of all fiber samples occurred when the shear stress reached a value approximately equal to the shear stress at which the destruction of samples made only from a binder material happened. When the specimen broke, the fracture mode had the form similar to the shear failure; besides, at the moment of fracture, the object having a rectangular shape, being deformed at an angle, took the form of a parallelogram.

Ключевые слова: композитный материал, связующий материал, волокнистый материал, наполнитель, дефект структуры.

Keywords: composite material, binding material, fibrous material, filler, structure defect.

Образец для цитирования: Влияние волнового эффекта на предел прочности волокна при испытаниях композитного материала на растяжение И. Р. Антибас [и др.] Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2019. — Т. 19, № 4. — С. 310−316. https://doi.org/ 10.23947/1992-5980-2019-19-4-310-316

For citation: I.R. Antypas, et al. Influence of wave effect on fiber stress limit under tensile tests of composite material. Vestnik of DSTU, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 310−316. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-4-310-316

Введение. В исследованиях применялись композитные материалы, широко используемые в строительстве. Использовались образцы различной толщины из многослойных материалов, содержащие непрерывные, длинные, короткие волокна и волокна, образующие ткань. Количество слоев наполнителя соответствовало сопротивляемости приложенным нагрузкам. Использовались волокна из стекла, углерода, кевлара или их комбинации в сочетании со связующими. Связующие материалы предназначены для развития адгезионной связи между волокнами, защиты их от окружающей среды и распределения нагрузки. В качестве связующих применялись изотропные материалы, такие как эпоксид, полиэстер и виниловый эфир [1].

Себестоимость изделий из полимерных композитов в основном зависит от стоимости ингредиентов и количества технологических этапов изготовления. Нарушения технологических регламентов приводит к отклонениям от требуемой структуры материала, образованию разного рода дефектов, в том числе реализуется волнистая форма волокон (рис. 1), нарушается однородность гетерогенной структуры. Все это приводит к ухудшению комплекса физико-механических свойств композита [2].

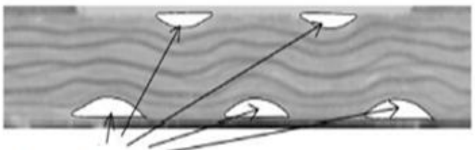


Рис. 1. Нарушения структуры композита в виде волнистой ориентации наполнителя и локальной концентрации связующего

Многие недостатки армированных композитов в большой степени связаны с наличием примесей и раковин в изделии. Раковины образуются в процессе отверждения связующего, которое изначально находясь в вязко-текучем состоянии транслировало газовые включения в виде пузырьков в объем композита в процессе свободной заливки формы. Неоднородность концентрации волокон и связующего в объеме материала возникает из-за наличия функциональных добавок или дополнительного наполнителя, например, песка (рис. 2).

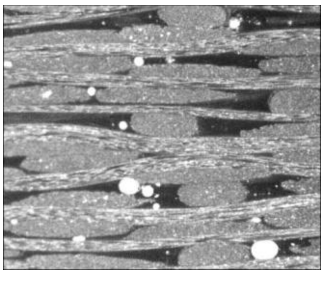
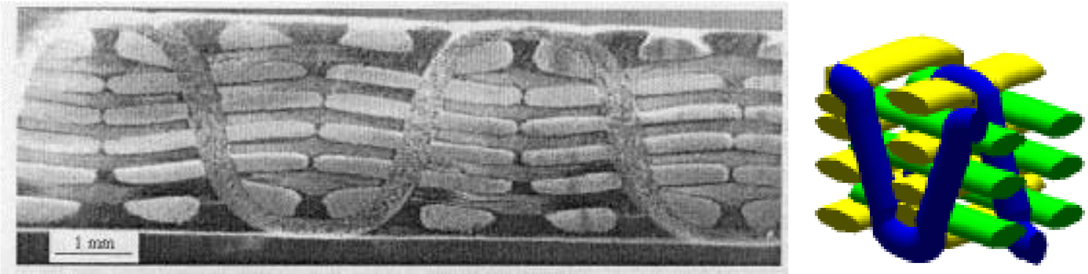


Рис. 2. Сечение композитного материала, содержащего пузырьки

На рис. 3 показано, что волновая ориентация волокон может располагаться в плоскости ткани, по структуре аналогичной фиброзной, а также в плоскости сплетенных волокон. Эти волокна обеспечивают стабильность структуры при транспортировке, обработке, а также облегчают технологическую проницаемость слоёв композитных материалов. Это позволяет соединять волокна в группы продольно или перпендикулярно друг к другу [3], что не препятствует образованию небольших волн в ткани.



а) *б*)

Рис. 3. Волновая ориентация волокон в плоскости слоя:
а — разрез композита; *б* — пространственная структура

Пространственные волновые структуры (рис. 4) реализуют с помощью текстильного оборудования. Эти структуры способны принимать конечную форму продукта, изготовленного из композитного материала. Затем такую структуру пропитывают связующим и формуют изделие одним из известных способов.

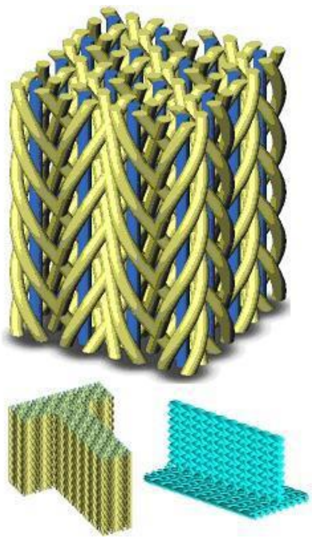
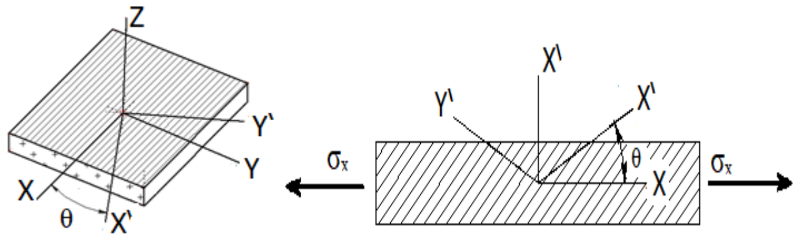


Рис. 4. Образцы волоконных структур трехмерного плетения

В [4, 5] описывается метод испытаний пространственных волоконных конструкций с различными компонентами и при наличии дефектов. Образование волновой конфигурации волокон в таких материалах может оказывать как отрицательное, так и позитивное влияние на свойства композитных материалов. В [6] проводится теоретический и практический поиск нелинейного поведения композитных материалов, армированных однонаправленными волокнами, в которых наблюдаются волны, возникающие под действием растягивающих нагрузок и давления.

Цель исследования. Целью данного исследования является изучение влияния волн на предел прочности при растяжении композитного материала, состоящего из полиэстера и стекловолокна, проведение анализа возникающих напряжений и изучение разрушения образца вследствие различных факторов.

Аналитическое исследование. Композитный материал с длинноволокнистым наполнителем может выдержать большую нагрузку, действующую вдоль волокон, что следует из рис. 5, *а*. Однако нагрузка, не соответствующая направлению волокон, распределяется между ними и связующим. Эта нагрузка зависит от угла между направлением ее действия и направлением ориентации волокон. Для определения напряжений, действующих перпендикулярно к волокну и вдоль него, авторы использовали координаты, получаемые поворотом общих координат x-y-z на угол θ вокруг оси z [7] (рис. 5, *б*).



а) *б*)

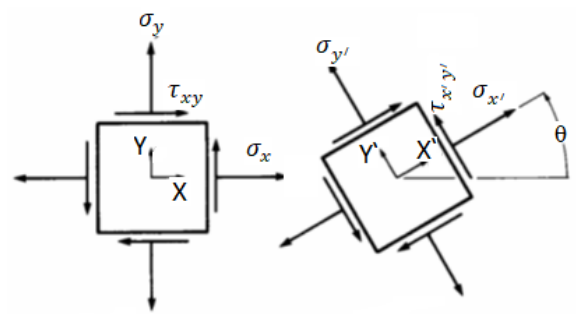
Рис. 5. Координаты пластин материалов: *а* — с прямыми волокнами, *б* — с волокнами под углом

Если бесконечно малый объемный элемент (рис. 6, *а*) извлечь из общих координат и повернуть на угол θ, то, используя уравнения (1), (2) и (3), можно определить нормальные и касательные напряжения, развиваемые в новом положении (рис. 6, *б*) [8]:

$$\sigma_{x'} = \frac{\sigma_x+\sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x-\sigma_y}{2}\cos 2\theta + \tau_{xy}\sin 2\theta, \quad (1)$$

$$\tau_{x'y'} = -\frac{\sigma_x-\sigma_y}{2}\sin 2\theta + \tau_{xy}\cos 2\theta, \quad (2)$$

$$\sigma_{y'} = \frac{\sigma_x+\sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x-\sigma_y}{2}\cos 2\theta - \tau_{xy}\sin 2\theta. \quad (3)$$



а) *б*)

Рис. 6. Напряжения, развиваемые в элементе бесконечно малого объёма:

а — в общей системе координат, *б* — в системе координат под углом

В случае волновой конфигурации волокон напряженное состояние материала наиболее опасно при максимальном значении угла (θ_{max}), так как нормальные напряжения ориентируются перпендикулярно слою армирующего наполнителя. Если рассмотреть бесконечно малый элемент в таком состоянии (рис. 7), то, вычислив значения напряжений из уравнений (1), (2), (3) и сравнив их значения, можно установить причины разрушения образца.

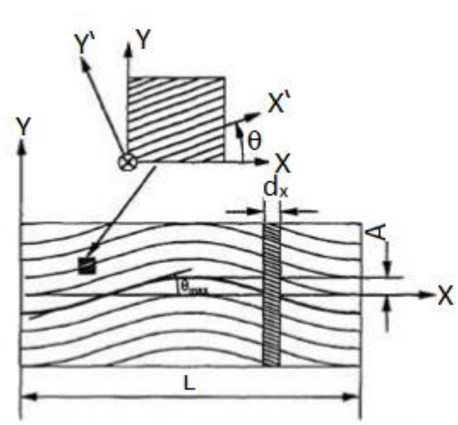


Рис. 7. Бесконечно малый объёмный элемент при максимальном значении угла наклона волокна (θ_{max})

Материалы и методы исследования. Изучалось влияние волнового эффекта на предел прочности при растяжении в соответствии со стандартом *ASTM D* 638-90 [9]. Испытанию подвергались образцы листовой формы из полимерных композитов, содержащих армирующий наполнитель (стекловолокно) и связующее (полиэстер), содержание отвердителя составляло 2 % от общего объёма. Образцы изготавливали методом свободного формования [10], при этом использован шаблон, состоящий из стеклянных пластин с размерами 38×25×6 мм, который вмещал 10 слоев стекловолокна, а в качестве буфера для предотвращения адгезии применяли прослойки из целлофана. В процессе формования использовали небольшую вибрацию в течение пяти минут. Выдержка для отверждения в форме — 24 ч. Выдержка для стабилизации структуры и свойств образцов в свободном состоянии перед испытаниями — 25 суток. С помощью специальных плат были изготовлены образцы без волнистости и с волновой ориентацией наполнителя. Причем последние отличались друг от друга по амплитуде волн. На рис. 8 показано образование волн в одиночной плате.



Рис. 8. Образование волн в одиночной плате

Результаты и обсуждение. Проведены испытания на растяжение образцов с волокнами без волнистости и с волокнами, имеющими синусоидальную форму полуволны, при углах их наклона: $\theta_{макс}$ = 10°, 18°, 22°, 28° и 38°. Установлена стабильность результатов испытания путем их взаимного сравнения для образцов без волнистости наполнителя, изготовленных на пяти различных платах. На рис. 9 показана кривая изменения напряжений при растяжении с изменением угла наклона волокна. При этом напряжения при растяжении σ_{max} для материала с безволновыми волокнами составили 250 МПа.

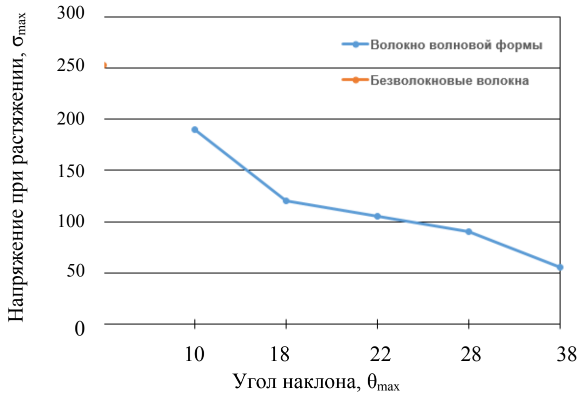


Рис. 9. Зависимость максимальных напряжений при растяжении σ_{max}, МПа, (на вертикальной оси) от угла наклона волокна θ_{max}

Используя уравнения (1) и (3) рассчитаны нормальные и касательные напряжения, действующие перпендикулярно волокнам, а также напряжения слоистого материала при сдвиге по уравнению (2).

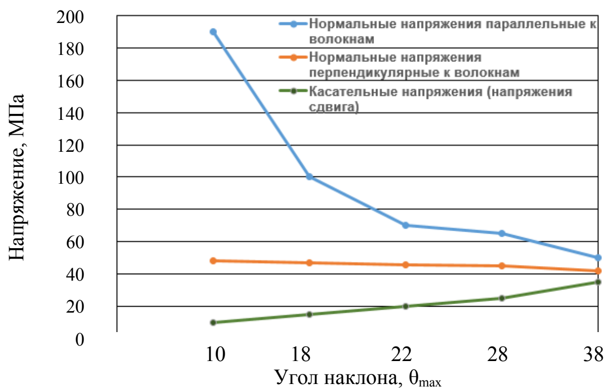


Рис. 10. Кривые зависимостей характерных напряжений от угла наклона волны θ_{max}

В результате анализа зависимостей для характерных напряжений при растяжении в координатах точки с углом наклона волокна θ_{max} и исследования сечения в месте разрушения образцов (рис. 11) установлено, что причиной разрушения является напряжение сдвига τ_{xy}. Сравнение этого напряжения с максимальным напряжением при сдвиге образца из полиэстера без волокон приведены в [10]. При этом предел текучести ($\sigma_т$) был принят равным 70 МПа. С помощью уравнения (2), которое позволяет компенсировать угол наклона $\theta = 45°$, нашли, что значение напряжения сдвига полиэстера $\tau_{xy} = 35$ МПа. Это и есть напряжение, которое впоследствии явилось причиной разрушения всех образцов. Уравнение (2) позволяет определить деформацию образцов в точке разрыва, а также даёт отображение деформаций и угловых смещений, доказывающих, что разрушение слоистого материала является следствием напряжений сдвига.



Рис. 11. Рефракция в сечении разрушения

Заключение. Исходя из результатов исследований можно сделать следующие выводы:

1. Напряжения при растяжении композитного материала уменьшаются с увеличением угла наклона волокон в определенных зонах. Полученный результат показал совпадение с исследованиями, проведёнными ранее [11, 12].

2. Установлено, что разрушение всех волокнистых образцов происходило при достижении напряжения сдвига, примерно равного напряжению сдвига, при котором разрушались образцы, изготовленные только из связующего. Это согласуется с [13, 14], данные различались лишь в отношении напряжений, развивающихся в связующем материале.

3. При разрыве образца форма разрушения имеет вид, аналогичный разрушению при сдвиге, причём в момент разрушения прямоугольный объект, деформируясь под углом, принимал форму параллелограмма.

4. Рекомендуется продолжить исследования в данной области, основными целями которых должны быть изучение влияния меньших углов пульсации волокна на предел прочности на разрыв композитного материала, а также изучение влияния волнового эффекта на коэффициент гибкости.

Библиографический список

1. Bacarreza, O. Woven Composites/ O. Bacarreza, P. Wen, and M.H. Aliabadi, in: M. H. Aliabadi (ed.) // Computational and Experimental Methods in Structures. — 2015. — Vol. 6, Ch. 1. — P. 1–74.

2. Sendeckyj, G.P. Effects of Defects in Composite Structures. In: A.K. Noor, M.J. Shuart, J.H. Strarnes Jr., J.G. Williams, eds. Failure Analysis and Mechanisms of Failure of Fibrous Composite Structures. NASA Conf. Pub., 1983, vol. 2278, pp. 305-312.

3. Textile composites and inflatable structures /E. Oñate, B.-H. Kröplin (Eds.). — 2005. — Vol. 3. — P. 322.

4. Potter, K. Variability, Fibre Waviness and Misalignment in the Determination of the Properties of composite Materials and Structures / K. Potter, B. Khan, M.Wisnom, T.Bell, J. Stevens // Composites Part A. — 2008. — Vol. 39. — P. 1343–1354.

5. Kharmanda, G. Integration of reliability and optimization concepts into composite yarns / G. Kharmanda, I. R. Antypas // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения : сб. статей 10-й Междунар. юбилейной науч.-практ. конф. в рамках 20-й Междунар. агропромышленной выставки «Интерагромаш-2017». — Ростов-на Дону, 2017. — С. 174–176.

6. Isa**,** M.T. Effect of fiber type and combinations on the mechanical / M. T. Isa, A. S. Ahmed, B. O. Aderemi, R. M. Taib, and I. A. Mohammed-dabo // Physical and thermal stability properties of polyester hybrid composites. — 2013. — Part B. — No. 52, — P. 217–223.

7. Ronald F. Gibson. Principles of Composite Material Mechanics/ Ronald F. Gibson // International Editions. — 1994. — McGraw-Hill Inc. — P. 7.

8. Антибас, И. Р. Сравнение амортизирующих свойств гофрированной картонной упаковки разной структуры при действии вертикальной нагрузки / И. Р. Антибас, С. А. Партко // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения : сб. статей 8-й междунар. науч.-практ. конф. в рамках 18-й междунар. агропромышленной выставки «Интерагромаш-2015». — Ростов-на Дону, 2015. — С. 232–235.

9. Антибас, И. Р Определение характеристик компонентов композитных материалов, предназначенных для производства деталей сельскохозяйственной техники / И. Р. Антибас, А. Г. Дьяченко // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2017. — Т. 17, № 3(90). — С. 60–69.

10. Антибас, И. Р Влияние содержания древесного дисперсного наполнителя на долговечность композиционных материалов / И. Р. Антибас, А. Г. Дьяченко // Вестник Донского. гос. техн. ун-та. — 2017. — Т. 17, № 1(88). — С. 67–74.

11. Karami**,** G. Finite Element Micromechanics for Stiffness and Strength of Wavy Fibre Composites / G. Karami, M. Garnich // Journal of Composite Materials. — 2004**.** — Vol. 38**.** — P. 273–292.

12. Chan**,** W.S. Influence of Fibre Waviness on the Structural Response off Composite Laminates / W.S. Chan, J.S. Wang // Journal of Thermoplastic Composite materials. — 1994. — Vol. 7. — P. 243–369.

13. Travis, A. Influence of Ply Waviness on the Stiffness and Strength Reduction on Composite Laminates / A. Travis, I. Bogett, W. John Jr., A. Gillespie // Journal of Thermoplastic Composite Materials. — 1992. — Vol. 5. — P. 344.

14. Garnich, Mark R. Localized Fibre Waviness and Implications for Failure in Unidirectional Composites / Mark R. Garnich and Ghodrat Karami // Journal of composite Materials. — 2005. — Vol. 39. — P. 1225–1245.

Сдана в редакцию 17.09.2019
Принята к публикации 08.11.2019

Об авторах:

Антибас Имад Ризакалла,
доцент кафедры «Основы конструирования машин» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-8141-9529
Imad.antypas@mail.ru

Дьяченко Алексей Геннадьевич,
доцент кафедры «Основы конструирования машин» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9934-4193
alexey-a2@mail.ru

Amer Karnouba,
guest researcher of the Department of Materials, Laboratory of Physics and Technology, ETH Zurich (8093 Zurich, Switzerland),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-9824-7364
amerkarnoub@gmail.com